



①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**
⑩ **DE 100 59 854 A 1**

⑤ Int. Cl.⁷:
G 01 N 25/72
G 01 N 29/06
G 01 N 21/88

⑳ Aktenzeichen: 100 59 854.4
㉔ Anmeldetag: 30. 11. 2000
㉓ Offenlegungstag: 13. 6. 2002

DE 100 59 854 A 1

㉑ Anmelder:

Busse, Gerd, Prof. Dr.rer.nat.habil., 71263 Weil der Stadt, DE; Zweschper, Thomas, 71229 Leonberg, DE; Dillenz, Alexander, 70619 Stuttgart, DE

㉒ Erfinder:

gleich Anmelder

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

⑤4 Bildgebendes Verfahren zur Darstellung eines temperaturmodulierten Gegenstandes mittels der Phase

⑤7 Das Funktionsprinzip der Erfindung besteht darin, dass ein Schall- oder Ultraschallburst (Wellenzug) in den zu untersuchenden Gegenstand eingeleitet wird. Diese Einbringung der Schallenergie führt zur selektiven Erwärmung von Bereichen des untersuchten Gegenstands, die mechanische Veränderungen aufweisen wie z. B. hohe mechanische Spannung oder mechanische Schädigung. Für jeden Bildpunkt des resultierenden zeitabhängigen Temperaturfeldes wird (z. B. mittels Fouriertransformation oder Wavelet-Transformation) die Phaseninformation berechnet. Das so erhaltene Bild enthält Informationen über den Zustand des Gegenstands, ist ansonsten jedoch frei von bei Thermografieaufnahmen sonst üblichen Störeinflüssen.

DE 100 59 854 A 1

- [0001] Die Erfindung betrifft ein bildgebendes Verfahren zur Darstellung eines temperaturmodulierten Gegenstandes mittels der Phase oder daraus abgeleiteter, anderer amplitudenunabhängiger Größen.
- 5 [0002] Der Einsatz neuer Materialien in Luft- und Raumfahrt sowie in der Automobilindustrie bedingt den Einsatz neuer, leistungsfähiger, bildgebender Prüfverfahren. Diese Verfahren müssen schnell und mit hoher Aussagesicherheit Aufschluss über Schäden in Gegenständen geben und robust genug sein, um unter rauen Einsatzbedingungen im industriellen Betrieb eingesetzt werden zu können. Hier haben sich in letzter Zeit Verfahren zur Darstellung eines temperaturmodulierten Gegenstandes ausgezeichnet (aktive Thermografie mit externer oder interner Wärmeeinbringung).
- 10 [0003] Man unterscheidet zwischen externer Wärmeeinbringung durch optische oder konvektive, intensitätsmodulierte Anregung der Probenoberfläche ("Lock-In-Thermografie" [1, 2, 3, 4, 5] oder Pulsthermografie [6]) und interner Wärmeeinbringung, z. B. durch Ultraschalleinkopplung [7, 8, 9]. Im Falle externer Anregung wird die Wechselwirkung thermischer Wellen, die an der Oberfläche des Prüfobjektes durch Absorption modulierter Strahlung erzeugt werden, mit verborgenen, thermischen Grenzflächen bildhaft erfasst.
- 15 [0004] Im Falle interner Anregung nutzt man hingegen die Tatsache, dass der mechanische Verlustwinkel in geschädigten Bereichen des Bauteils meistens erhöht ist. Wird Schall in ein defektbehaftetes Bauteil eingeleitet, dann wird er bevorzugt an den schadhaften Stellen (z. B. hysteresebedingt) in Wärme umgewandelt. Bei Betrachtung mit einer Thermografiekamera leuchten also diese geschädigten Stellen im Thermografiebild selektiv auf. Die Verwendung von Ultraschallanregung (statt der optischen) in Verbindung mit thermischen Wellen ergibt also ein zuverlässigeres, da defektselektives, bildgebendes Verfahren [9].
- 20 [0005] Weiterhin werden die bisherigen Verfahren nach dem zeitlichen Verlauf der Energieeinbringung unterschieden: Pulsförmig ("Pulsthermografie") und sinusförmig ("Lock-In-Thermografie").
- [0006] Im Falle der Lock-In-Thermografie werden aus dem gemessenen, sinusförmigen Signal durch Fouriertransformation Phase und Amplitude der thermischen Welle berechnet. Der Phasenwinkel hat den Vorteil, dass lokale Störungen (z. B. Inhomogenitäten der Oberfläche des Gegenstandes [10], des Thermografie-Systems oder der Wärmeeinbringung 25 [11]) unterdrückt werden. Falls jedoch die thermischen Eigenschaften des Gegenstandes unbekannt sind, dann müssen Phasenbilder bei verschiedenen Frequenzen aufgenommen werden, um optimale Ergebnisse zu erzielen. Dies führt zu einer unerwünscht langen Messzeit.
- [0007] Im Falle der Pulsthermografie wird der zu untersuchende Gegenstand mit einem kurzen Energiepuls aufgeheizt (Licht, Wirbelstrom, oder Ultraschall) und die Temperaturantwort nach einer bestimmten Zeit aufgenommen. Die Messzeit ist dabei relativ kurz. Nachteilig ist hier aber, dass zur Auswertung und Fehlererkennung kein Phasenwinkelbild, sondern lediglich ein einfaches Temperaturbild verwendet wird. Dieses ist durch Störungen beeinflussbar, die – im Unterschied zur Lock-In-Thermografie – nicht unterdrückt werden. Da der zu untersuchende Gegenstand durch die hohe Pulsleistung sehr stark belastet wird, besteht zudem die Gefahr der Schädigung.
- 35 [0008] Ultraschall-Burst-Phasen-Thermografie vereint die Vorteile der bekannten Methoden Ultraschall-Lock-In-Thermografie und Pulsthermografie, nämlich kurze Messzeit mit den oben genannten Vorteilen der Phasenbilder.
- [0009] Das Funktionsprinzip der Ultraschall-Burst-Phasen-Thermografie besteht darin, dass ein Ultraschallburst, also ein Wellenzug (typischerweise mit einer Frequenz von 20 kHz–100 kHz und einer Länge von einigen Hundertstel Sekunden bis zu wenigen Sekunden) in das zu untersuchende Bauteil eingeleitet wird. Diese Einbringung des Ultraschalls in das Bauteil erfolgt dabei entweder von außen durch Ankopplung eines Ultraschallgebers oder durch einen in den Gegenstand eingebauten Aktor.
- 40 [0010] Für jeden Bildpunkt des resultierenden, zeitabhängigen Temperaturfeldes wird (z. B. mittels Fouriertransformation oder Wavelet-Transformation) die Phaseninformation berechnet. Der so ermittelte Phasenwinkel zeichnet sich auch in diesem Fall dadurch aus, dass die oben erwähnten Inhomogenitäten unterdrückt werden. Zusätzlich ist das Signal-Rauschverhältnis des Phasenbildes gegenüber dem primär erhaltenen, einzelnen Thermografiebild verbessert. Zudem hat das Phasenbild eine größere Tiefenreichweite als das Temperaturbild [12].
- 45 [0011] Dies wird hier beispielhaft anhand eines Versuchsaufbaus, der einen externen Ultraschallgeber (US) zur Energieeinbringung in den nutzt. Der Steuerrechner (PC) triggert über eine Synchronisationsleitung (sync) den Funktionsgenerator (SG), der daraufhin ein Burstsinal von definierter Länge erzeugt. Der Leistungsverstärker (PA) bereitet das Signal für den Ultraschallgeber (US) auf, der an den Gegenstand (G) angekoppelt ist (z. B. durch eine Klemmung). Währenddessen beginnt die Thermografiekamera den zeitlichen Temperaturverlauf bildhaft zu erfassen. Die Daten werden über die Datenleitung (data) an den Rechner (PC) geleitet und mittels der diskreten Fouriertransformation transformiert:

$$F_{(x,y)}(\omega) = \sum_i T_{(x,y)}(t) \exp(i\omega t) \quad (1)$$

wobei ω die Transformationsfrequenz und T den Temperaturverlauf eines durch die Koordinaten (x, y) bestimmten Pixels bezeichnen. Die Phase $\varphi_{(x,y)}$ ist dann gegeben durch:

$$\varphi_{(x,y)}(\omega) = \arctan \left(\frac{\text{Im}(F_{(x,y)}(\omega))}{\text{Re}(F_{(x,y)}(\omega))} \right) \quad (2)$$

[0012] Diese wird nun bildhaft dargestellt und gibt ein defektselektives Fehlerbild des untersuchten Gegenstands.

Literatur

- [1] G. M. Carlomagno, P. G. Berardi, "Unsteady thermotopography in non-destructive testing", Proc. 3rd Biannual Ex-

change, St. Louis/USA, 24.-26. August 1976, S. 33-39.

- [2] J. L.; Merienne E.; Danjoux R.; Egee M., "Numerical system for infrared scanners and application to the subsurface control of materials by photothermal radiometry", *Infrared Technology and Applications*, SPIE Vol. 590 (1985) S. 287.
- [3] P. K. Kuo, Z. J. Feng, T. Ahmed, L. D. Favro, R. L. Thomas, J. Hartikainen, "Parallel thermal wave imaging using a vector lock-in video technique", *Photoacoustic and Photothermal Phenomena*, ed. P. Hess and J. Pelzl. Heidelberg: Springer-Verlag, (1987) S. 415-418.
- [4] G. Busse, D. Wu, and W. Karpen, "Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography", *J. Appl. Phys.* 71, 1992, S. 3962-3965.
- [5] G. Busse, D. Wu, "Verfahren zur Phasenempfindlichen Darstellung eines effektmodulierten Gegenstandes", Patent Nr. 42 03 272, 1995.
- [6] R. L. Thomas, L. D. Favro, P. K. Kuo, T. Ahmed, Xiaoyan Han, Li Wang, Xun Wang and S. M. Shepard, "Pulse-Echo Thermal-Wave Imaging for Non-Destructive Evaluation", *Proc. 15th International Congress on Acoustics*, Trondheim, Norway, June 26-30, 1995, S. 433-436.
- [7] R. B. Mignogna, R. E. Green, J. Duke, E. G. Henneke, K. L. Reifsnider, "Thermographic investigations of high-power ultrasonic heating in materials", *Ultrasonics* 7, 1981, S. 159-163.
- [8] L. D. Favro, Xiaoyan Han, Zhong Ouyang, Gang Sun, Hua Sui, and R. L. Thomas, "Infrared imaging of defects heated by a sonic pulse", *Rev. Sci. Instr.* 71, 6, 2000, S. 2418-2421.
- [9] J. Rantala, D. Wu, G. Busse, "Amplitude modulated lock-in vibrothermography for NDE of polymers and composites", *Res. Nondestr. Eval.* 7, Springer-Verlag, New York, 1996, S. 215-228
- [10] A. Rosencwaig, G. Busse, "High resolution photoacoustic thermal wave microscopy", *Appl. Phys. Lett.* 36, 1980, S. 725-727.
- [11] D. Wu, "Lock-in-Thermografie für die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung und Werkstoffcharakterisierung", Dissertation, Universität Stuttgart, 1996.
- [12] G. Busse, "Optoacoustic phase angle measurement for probing a metal", *Appl. Phys. Lett.* 35, 1979, S. 759-760.

Patentansprüche

1. Bildgebendes Verfahren zur Darstellung eines temperaturmodulierten Gegenstandes mittels der Phase oder daraus abgeleiteter, anderer amplitudenunabhängiger Größen mit folgenden Schritten:
 - Verwendung eines Anregungssignals, das aus einem periodischen Signal (Trägerfrequenz) mit einem aperi-
 - odischen Hüllsignal (z. B. Burst) besteht, zur Erzeugung elastischer Wellen im Gegenstand;
 - Erfassung der aus der Anregung resultierenden Temperaturmodulation mittels einer Thermographiekamera;
 - Ermittlung des Phasenwinkels, des Laufwegs, der Laufzeit oder anderer, daraus abgeleiteter Größen der hüllkurvenkorrelierten Temperaturmodulation für jeden Bildpunkt.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die elastischen Wellen im Gegenstand von aussen mittels eines externen Gebers elastischer Wellen (z. B. Schwingungs- oder Ultraschallgeber) erzeugt werden.
3. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die elastischen Wellen mittels eines im Bauteil integrierten Schwingungs- oder Ultraschall-Gebers (z. B. Aktor) erzeugt werden.
4. Verfahren nach Anspruch 1-3, dadurch gekennzeichnet, dass zur Erzeugung der elastischen Wellen mehrere einzelne Anregungssignale mit unterschiedlichen Trägerfrequenzen überlagert werden.
5. Verfahren nach Anspruch 1-3, dadurch gekennzeichnet, dass zur Erzeugung der elastischen Wellen Trägerfrequenzen zu einem kontinuierlichen Spektrum überlagert werden (bis zum Grenzfall des weissen Rauschens).

Hierzu 1 Seite(n) Zeichnungen

BEST AVAILABLE COPY

